

English Translation of the Abstract of
Japanese Laid-Open Patent Application No. Hei 11-44810



(57) **【Abstract】**

【Subject】 There are provided a diffractive optical element which is capable of maintaining a high diffraction efficiency throughout the entire useful wavelength region with little variations of the diffraction efficiency even in the case of occurrence of a change of temperature, and an optical system using the diffractive optical element.

【Means for Solution】 In a diffractive optical element in which a plurality of layers made from at least two kinds of materials which differ in dispersion are laminated on a substrate and diffraction gratings are formed at the respective layers so as to heighten the diffraction efficiency for a particular order (design order) throughout the entire useful wavelength region, each of the layers is constructed with such a combination of the material and the grating thickness that a value obtained by summing up values for all the layers each of which is obtained by multiplying a rate of change of refractive index due to a temperature change of the material forming each layer by the grating thickness of the associated diffraction grating is less than a useful wavelength.

TC 2 300 1711 1000

1000 20

1000 20

(51) Int.Cl.⁶G 0 2 B 5/18
27/42

識別記号

F I

G 0 2 B 5/18
27/42

審査請求 未請求 請求項の数13 F D (全 11 頁)

(21) 出願番号 特願平9-217103

(22) 出願日 平成9年(1997) 7月28日

(71) 出願人 000001007

キヤノン株式会社

東京都大田区下丸子3丁目30番2号

(72) 発明者 中井 武彦

東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キヤ
ノン株式会社内

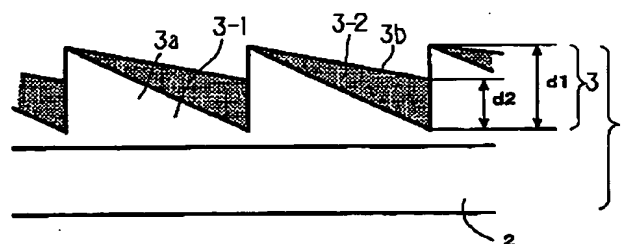
(74) 代理人 弁理士 高梨 幸雄

(54) 【発明の名称】 回折光学素子及びそれを用いた光学系

(57) 【要約】

【課題】 温度変化が生じた場合でも、回折効率の変動が少なく使用波長全域で高い回折効率を維持することができる回折光学素子及びそれを用いた光学系を得ること。

【解決手段】 少なくとも2種類の分散の異なる材質からなる層を複数、基盤上に積層し、各層で回折格子を形成し、使用波長領域全域で特定次数（設計次数）の回折効率を高くするようにした回折光学素子に於いて、各層はそれを形成する材質の温度変化による屈折率変化率と各回折格子の格子厚を掛け合わせた値を全ての層について加え合わせ、このときの値が、使用波長に対して小さくなるような材質と格子厚の組み合わせより構成していること。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 少なくとも2種類の分散の異なる材質からなる層を複数、基盤上に積層し、各層で回折格子を形成し、使用波長領域全域で特定次数（設計次数）の回折効率を高くするようにした回折光学素子に於いて、各層はそれを形成する材質の温度変化による屈折率変化率と各回折格子の格子厚を掛け合わせた値を全ての層について加え合わせ、このときの値が、使用波長に対して小さくなるような材質と格子厚の組み合わせより構成していることを特徴とする回折光学素子。

【請求項2】 分散の異なる材質からなる第1層と第2層を基盤上に積層し、第1層と第2層の境界で第1の回折格子面、第2層と空気の境界で第2の回折格子面を形成し、使用波長領域全域で特定次数（設計次数）の回折効率を高くするようにした回折光学素子に於いて、該第1層、第2層の材質の温度変化による屈折率変化率を各々 $dn1/dt$ 、 $dn2/dt$ 、第1層に設けられた第1の回折格子の格子厚を $d1$ 、第1の回折格子面と第2の回折格子面をもつ、第2層に設けられた第2の回折格子の格子厚を $d2$ とし、温度変化による屈折率変化率に第1、第2の回折格子の格子厚を掛け合わせた値 ϕt を、

$$\phi t = (dn1/dt) d1 - (dn2/dt) d2$$
とし、温度変化量を Δt 、設計次数を m 、使用波長を λ_0 としたとき

$$|\phi t \cdot \Delta t| < m \cdot \lambda_0 / 4$$
を満たすことを特徴とする回折光学素子。

【請求項3】 少なくとも2種類の分散の異なる材質からなる層を複数、基盤上に積層し、各層で回折格子を形成し、使用波長領域全域で特定次数（設計次数）の回折効率を高くするようにした回折光学素子に於いて、第 L 層の材質の温度変化による屈折率変化を $dnoL/dt$ とし、第 L 層の回折格子の格子厚を dL 、とし、温度変化による屈折率変化率に各回折格子の格子厚を掛け合わせた値 ϕt を、

$$\phi t = (dno1/dt) d1 \pm (dno2/dt) d2 \pm \dots \pm (dnoL/dt) dL$$
とし、温度変化量を Δt 、設計次数を m 、使用波長を λ_0 としたとき

$$|\phi t \cdot \Delta t| < (m \cdot \lambda_0) / 4$$
を満たすことを特徴とする回折光学素子。

【請求項4】 前記基盤上に形成した複数の回折格子の積層格子構造は、1周期内での格子厚みが一方向で単調に減少していく回折格子と、一方向で単調に増加する回折格子を組み合わせて構成された構造を有し、少なくとも1種類は単調減少する格子と単調増加する格子が含まれた構成とすることを特徴とする請求項1、2、3記載の回折光学素子。

【請求項5】 前記複数の層のうち、その光学的形状（光学光路長）が、1周期内で格子厚みが単調増加の場合、単調減少する層の材質の分散が、単調増加する層

の材質の分散より大きいことを特徴とする請求項4の回折光学素子。

【請求項6】 前記複数の層のうち、その光学的形状（光学光路長）が、1周期内で格子厚みが単調減少の場合は、単調増加する層の材質の分散が、単調減少する層の材質の分散より大きいことを特徴とする請求項4の回折光学素子。

【請求項7】 前記複数の層のうち少なくとも1つは、その材質がプラスチック光学材料または、紫外線硬化樹脂であることを特徴とする請求項1、2又は3の回折光学素子。

【請求項8】 前記使用波長域が、可視光域であることを特徴とする請求項1、2又は3の回折光学素子。

【請求項9】 前記基盤の上に積層された複数の層のうち、基盤に接している層と基盤が同材質であることを特徴とする請求項1、2又は3の回折光学素子。

【請求項10】 前記 $|\phi t \cdot \Delta t|$ の値が使用波長の $m/8$ 以下であることを特徴とする請求項2又は3の回折光学素子。

【請求項11】 請求項1～10のいずれか1項記載の回折光学素子を用いたことを特徴とする光学系。

【請求項12】 前記光学系は、結像光学系であることを特徴とする請求項11の光学系。

【請求項13】 前記光学系は、観察光学系であることを特徴とする請求項11の光学系。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は回折光学素子のうち特に複数の波長、あるいは所定の帯域の光が特定次数（設計次数）に集中するような格子構造を有した回折光学素子及びそれを用いた光学系に関するものである。

【0002】

【従来の技術】従来より光学系の色収差を補正する方法の1つとして、分散の異なる2つの材質の硝材（レンズ）を組み合わせる方法がある。

【0003】この硝材の組み合わせにより色収差を減じる方法に対して、レンズ面やあるいは光学系の1部に回折作用を有する回折格子を設けた回折光学素子を用いて、色収差を減じる方法がSPIE Vol.1354 International Lens Design Conference (1990)等の文献や特開平4-213421号公報、特開平6-324262号公報、そしてUSP第5044706号等により開示されている。

【0004】これは、光学系中の屈折面と回折面とでは、ある基準波長の光線に対する色収差の出方が逆方向になるという物理現象を利用したものである。

【0005】さらに、このような回折光学素子は、その回折格子の周期的構造の周期を変化させることで非球面レンズ的な効果をもたせることができ収差の低減に大きな効果がある。

【0006】ここで、光線の屈折作用において比較すると、レンズ面では1本の光線は屈折後も1本の光線であるのに対し、回折面では1本の光線が回折されると、各次数に光が複数に分かれてしまう。

【0007】そこで、レンズ系として回折光学素子を用いる場合には、使用波長領域の光束が特定次数（以後設計次数とも言う）に集中するように格子構造を決定する必要がある。特定の次数に光が集中している場合では、それ以外の回折光の光線の強度は低いものとなり、強度が0の場合にはその回折光は存在しないものとなる。

【0008】そのため前記特長を、有するためには設計次数の光線の回折効率が十分高いことが必要になる。また、設計次数以外の回折次数をもった光線が存在する場合は、設計次数の光線とは別な所に結像するため、フレア光となる。

【0009】従って回折光学素子を利用した光学系においては、設計次数での回折効率の分光分布及び設計次数以外の光線の振る舞いについても十分考慮する事が重要である。

【0010】図12に示すような基盤2に1つの層より成る回折格子3を設けた回折光学素子1を光学系のある面に形成した場合の特定の回折次数に対する回折効率の特性を図13に示す。この回折光学素子の光学材料としては、プラスチック材料であるPMMA ($n_d=1.4917$ 、 $v_d=57.4$)を用い、格子厚 d を $1.07\mu m$ と設定した。この図で、横軸は波長をあらわし、縦軸は回折効率を表している。

【0011】この回折光学素子1は、1次の回折次数（図中実線）において、使用波長領域（波長 $530nm$ 近傍）でもっとも回折効率が高くなるように設計されている。即ち設計次数は1次となる。

【0012】さらに、設計次数近傍の回折次数（1次±1次の0次光と2次光）の回折効率も併せ並記しておく。図に示されるように、設計次数では回折効率はある波長で最も高くなり（以下「設計波長」と言う）それ以外の波長では序々に低くなる。上記構成では設計波長は $\lambda=530nm$ に設定している。この設計次数での回折効率の低下分は、他の次数の回折光となり、フレアとなる。また、回折格子を複数枚使用した場合には特に、設計波長以外の波長での回折効率の低下は透過率の低下にもつながる。

【0013】この回折効率の低下を減少できる構成が特開平9-127321号公報に提示されている。これは異なる材質の分散と各格子厚を最適に選ぶことで、広波長範囲で高い回折効率を有する構成となっている。

【0014】具体的には基盤上に複数の光学材料（層）を積層し、互いに異なる光学材料の境界面の少なくとも1つにレリーフパターンを形成して成る回折光学素子を開示している。

【0015】

【発明が解決しようとする課題】基盤上に複数の層を積層した複数の層の格子構造をもつ回折光学素子で、高い回折効率を実現できる組み合わせの中には、通常の1層の場合の屈折率差に比べ、各境界を形成する材質の屈折率差を十分にとれず格子厚が厚くなる組み合わせが存在する。この格子厚が厚くなる組み合わせの場合、温度変化による材質の屈折率変動で回折効率が低下してしまうという問題点がある。

【0016】特に組み合わせによっては、温度変化時は従来の1層の回折効率より悪化するものもある。

【0017】本発明は、基盤上に2層又はそれ以上の多層を積層して回折光学素子を形成するとき、各層の材質と格子厚を適切に構成することにより、高い回折効率を有するとともに、温度変化による屈折率変動で回折効率が劣化することがなく、常に使用波長域全域で高い回折効率が維持できるような回折光学素子及びそれを用いた光学系の提供を目的とする。

【0018】

【課題を解決するための手段】本発明の回折光学素子は、

(1) 少なくとも2種類の分散の異なる材質からなる層を複数、基盤上に積層し、各層で回折格子を形成し、使用波長領域全域で特定次数（設計次数）の回折効率を高くするようにした回折光学素子に於いて、各層はそれを形成する材質の温度変化による屈折率変化率と各回折格子の格子厚を掛け合わせた値を全ての層について加え合わせ、このときの値が、使用波長に対して小さくなるような材質と格子厚の組み合わせより構成していることを特徴としている。

【0019】(2) 分散の異なる材質からなる第1層と第2層を基盤上に積層し、第1層と第2層の境界で第1の回折格子面、第2層と空気の境界で第2の回折格子面を形成し、使用波長領域全域で特定次数（設計次数）の回折効率を高くするようにした回折光学素子に於いて、該第1層、第2層の材質の温度変化による屈折率変化率を各々 dn_1/dt 、 dn_2/dt 、第1層に設けられた第1の回折格子の格子厚を d_1 、第1の回折格子面と第2の回折格子面をもつ、第2層に設けられた第2の回折格子の格子厚を d_2 とし、温度変化による屈折率変化率に第1、第2の回折格子の格子厚を掛け合わせた値 ϕt を、 $\phi t = (dn_1/dt) d_1 - (dn_2/dt) d_2$ とし、温度変化量を Δt 、設計次数を m 、使用波長を λ_0 としたとき

$$|\phi t \cdot \Delta t| < m \cdot \lambda_0 / 4$$

を満たすことを特徴としている。

【0020】(3) 少なくとも2種類の分散の異なる材質からなる層を複数、基盤上に積層し、各層で回折格子を形成し、使用波長領域全域で特定次数（設計次数）の回折効率を高くするようにした回折光学素子に於いて、第1層の材質の温度変化による屈折率変化を dn_1/dt と

し、第1層の回折格子の格子厚を d_1 、とし、温度変化による屈折率変化率に各回折格子の格子厚を掛け合わせた値 ϕt を、

$$\phi t = (dn_1/dt) d_1 \pm (dn_2/dt) d_2 \pm \dots \pm (dn_L/dt) d_L$$

とし、温度変化量を Δt 、設計次数を m 、使用波長を λ_0 としたとき

$$|\phi t \cdot \Delta t| < (m \cdot \lambda_0) / 4$$

を満たすことを特徴としている。

【0021】又、構成(1)、又は(2)、又は(3) 10 において、

(3-1) 前記基盤上に形成した複数の回折格子の積層格子構造は、1周期内での格子厚みが一方向で単調に減少していく回折格子と、一方向で単調に増加する回折格子を組み合わせて構成された構造を有し、少なくとも1種類は単調減少する格子と単調増加する格子が含まれた構成とすることを特徴としている。

【0022】特に、

(3-1-1) 前記複数の層のうち、その光学的形状(光学光路長)が、1周期内で格子厚みが単調増加の場合は、単 20 調減少する層の材質の分散が、単調増加する層の材質の分散より大きいこと。

【0023】(3-1-2) 前記複数の層のうち、その光学的形状(光学光路長)が、1周期内で格子厚みが単調減少の場合は、単調増加する層の材質の分散が、単調減少する層の材質の分散より大きいこと。等の特徴としている。

【0024】(3-2) 前記複数の層のうち少なくとも1つは、その材質がプラスチック光学材料または、紫外線硬化樹脂であること。

【0025】(3-3) 前記使用波長域が、可視光域であること。

【0026】(3-4) 前記基盤の上に積層された複数の層のうち、基盤に接している層と基盤が同材質であること。

【0027】(3-5) 前記 $|\phi t \cdot \Delta t|$ の値が使用波長の $m/8$ 以下であること。等の特徴としている。

【0028】本発明の回折光学素子を用いた光学系は、構成(1)、又は(2)又は(3)の回折光学素子を一部に用いていることを特徴としている。

【0029】特に、回折光学素子を結像光学系や観察光学系に用いていることを特徴としている。

【0030】

【発明の実施の形態】図1は本発明の回折光学素子の実施形態1の正面図である。同図において回折光学素子1は基盤2の表面に複数の層より成る多層部3が作成された構成となっている。

【0031】図2は図1の回折光学素子1を図中A-A'断面で切断した断面形状の一部である。図2は格子(回折格子)の深さ方向にかなりデフォルメされた図と 50

なっている。本実施形態の回折格子の形状は、基盤2上に互いに分散の異なる材質より成る第1層3-1と第2層3-2を積層し、第1層3-1と第2層3-2との境界で第1の回折格子面3aを形成し、第2層3-2と空気との境界で第2の回折格子面3bを形成している。そして、第1層と第1の回折格子面により、第1の回折格子3-1が、第2層とそれに接する第1の回折格子面と第2の回折格子面により第2の回折格子3-2が、形成されている。

【0032】本実施形態では第1の回折格子3-1と第1の回折格子3-1上に作られた第2の回折格子3-2からなる構造を有している。

【0033】さらに、本実施形態における各回折格子3-1、3-2の形状は格子厚 d_1 、 d_2 が1周期内で図中左から右に単調減少する第1の回折格子3-1と、1周期内で単調増加する第2の回折格子3-2を重ね合わせた構成になっている。

【0034】本実施形態の回折光学素子は少なくとも2種類の分散の異なる材質からなる層を複数、基盤上に積層し、各層で回折格子を形成した格子構造をもち、各回折格子の格子厚に各層の材質の温度変化による屈折率変化率をかけあわせた値の総和が使用波長に比べて十分小さくなるようにした構成したことを特徴としている。

【0035】また分散の異なる材質からなる層は、1周期内の格子厚の厚みが分散の異なる材質間で単調増加と、単調減少の層が少なくとも1組以上ある格子構造となることを特徴としている。

【0036】そして複数の層のうち、その光学的形状(光学光路長)が、1周期内で格子厚みが単調増加の場合は、単調減少する層の材質の分散が、単調増加する層の材質の分散より大きいことを特徴としている。

【0037】又、複数の層のうち、その光学的形状(光学光路長)が、1周期内で格子厚みが単調減少の場合は、単調増加する層の材質の分散が、単調減少する層の材質の分散より大きいことを特徴としている。

【0038】次に広波長域で設計次数の回折効率が高くなる第1、第2の回折格子3-1、3-2を形成する層の材質の組み合わせについて記述する前に、2層構造の回折格子の回折効率の振る舞い及び従来の材質の組み合わせの場合による回折効率についてに説明する。図12に示すような空気中で使用される透過型の回折光学素子1で、設計波長 λ_0 で回折効率が最大となる条件は、光束が回折格子3に対して垂直入射した場合は、回折格子の山と谷の光学光路長差 d_0 が波長の整数倍になればよく

$$d_0 = (n_0 - 1) d = m \lambda_0 \quad \dots \dots (1)$$

となる。ここで n_0 は波長 λ_0 での材質の屈折率、 d は格子厚、 m は回折次数である。

【0039】2層構造の回折光学素子では、回折格子の向きの違う2つの回折格子が、重なって1つの回折光学

素子を構成しているので、(1)式と同様の条件式は

$$(n_{01}-1)d_1 - (n_{02}-1)d_2 = m\lambda_0 \dots\dots (2)$$

となる。ここで各層の格子厚 d_1 、 d_2 は絶対値の値となっている。また n_{01} は第1層の材質の波長 λ_0 での

$$\eta = \text{sinc}^2 \left[\frac{(n_{01}-1)d_1 - (n_{02}-1)d_2}{m\lambda_0 - 1} \right] \\ = \text{sinc}^2 (\phi_0 / m\lambda_0) \dots\dots (3)$$

ここで ϕ_0 は位相誤差であり、 $\phi_0 = (n_{01}-1)d_1 - (n_{02}-1)d_2 - m\lambda_0$ である。又、 $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x) / \pi x$ なる関数で表される。

【0040】従って使用波長域全域で(2)式がみたされれば、回折効率 η は(3)式において位相誤差 ϕ_0 が0となり、 $\eta = \text{sinc}^2[0] = 1$ より全ての使用波長で最大となる。

【0041】次に本実施形態の回折光学素子1の格子構造について実際の数値を基に格子形状について説明する。使用波長域は可視域で、この回折格子の設計次数を+1次($m=1$)とする。基盤2及び第1の回折格子3-1を形成する第1層3-1は低吸湿アクリル($n_d=1.4970$ 、 $v_d=56.0$)なる材質を使用し、第2の回折格子3

$$(1.49911-1)d_1 - (1.48480-1)d_2 = 0.54607 \dots\dots (4)$$

$$(1.50810-1)d_1 - (1.49692-1)d_2 = 0.435835 \dots\dots (5)$$

$$(1.49432-1)d_1 - (1.47881-1)d_2 = 0.65627 \dots\dots (6)$$

式が3つに対し変数が2つなので全ての式を満足する材質の厚みは求められない。

【0044】例えばe線とg線を取り(4)、(5)式から格子厚 d_1 、 d_2 を求めると $d_1 = 35.4 \mu\text{m}$ 、 $d_2 = 35.4 \mu\text{m}$ となる。この厚みを(6)式の左辺に代入すると、0.549 となる。これは、光学光路長差が $0.549 \mu\text{m}$ であることを意味し、C線の波長 $0.65627 \mu\text{m}$ に対して光路長差が短くなり、若干回折効率を最大にする条件から外れている。このため、回折効率は(3)式より $\eta = \text{sinc}^2(0.549/1 \times 0.656 - 1) = 9.8\%$ 程度に低下する。このようにして、使用波長領域で各波長に対して回折格子の光学光路長差と波長の関係から回折効率が求められる。

【0045】図14に上記格子厚 d_1 、 d_2 での可視域における回折効率を示す。図中曲線①で示された実線が上記関係を満たす初期状態の回折光学素子1の回折効率である。この図でg線、e線の波長では、回折効率が最大となる条件を満足しているため、回折効率は100%を示している。一方、C線の波長では、回折効率は9.8

$$\eta_t = \text{sinc}^2 \left[\frac{(n_{01t}-1)d_1 - (n_{02t}-1)d_2}{m\lambda_0 - 1} \right] \\ = \text{sinc}^2 \left[\frac{(n_{01}-1)d_1 - (n_{02}-1)d_2}{m\lambda_0 - 1} + \left\{ \left(\frac{dn_{01}}{dt} \right) d_1 - \left(\frac{dn_{02}}{dt} \right) d_2 \right\} \frac{\Delta t}{m\lambda_0} \right] \\ = \text{sinc}^2 (\phi_0 / m\lambda_0 + \phi_t \Delta t / m\lambda_0) \dots\dots (7)$$

で表される。

【0049】(7)式中位相誤差 $\phi_0 = \{ (n_{01}-1$

屈折率、 n_{02} は第2層の材質の波長 λ_0 での屈折率である。このとき回折効率 η は

-2を形成する第2層3-2はCargille Laboratories Inc.製のImmersion Liquid I. L1160($n_d=1.4820$ 、 $v_d=42.3$)なる材質を使用した。

【0042】従って第1層の材質の屈折率 n_1 は、e線(波長 $0.546 \mu\text{m}$)、g線(波長 $0.436 \mu\text{m}$)、C線(波長 $0.656 \mu\text{m}$)において、それぞれ1.49911、1.50810、1.49432である。

【0043】一方第2層の材質の屈折率 n_2 はそれぞれ1.48480、1.49692、1.47881となる。従って(2)式は上記3つの波長についてそれぞれ以下の式が成立する。

%程度に低下している。しかし、従来の1層より成る回折格子の回折効率では、図13に示したように最大68%程度に低下しているのと比較すると、可視域全域で十分高い回折効率を維持していることがわかる。

【0046】また図15に設計次数近傍(0次、2次)の回折効率を示す。図中曲線②で示された曲線が同様に初期状態の設計次数近傍(0次、2次)の回折効率である。この図から設計次数近傍の回折光も全域で2%以下と大幅に抑制されていることがわかる。

【0047】次に温度変化により第1、第2層の各材質の屈折率が変化した場合の回折効率の変動について説明する。各材質の温度 t に対する屈折率 n の変化量(屈折率変化率)を dn/dt とし、温度変化量を Δt とする。このとき温度変化により各材質の屈折率は、 $n_{01t} = n_{01} + (dn_{01}/dt) \times \Delta t$ 、 $n_{02t} = n_{02} + (dn_{02}/dt) \times \Delta t$ に変化する。

【0048】従って温度変化後の回折効率 η_t は(3)式より、

$\{ (n_{02}-1)d_2 \} - m\lambda_0$ の項は初期の形状決定で決まる値であり、温度変化に依存しない。

【0050】従ってこのことより、回折効率の温度変化による変動を抑制するためには、(7)式中 $\phi t = \{ (dn_01/dt) * d_1 - (dn_02/dt) * d_2 \}$ の項が小さくなる必要がある。

【0051】次に前記材質で温度変化が5deg生じた場合の回折効率の変化量を示す。前記第1, 第2層の材質の温度変化による屈折率変化率は $dn_01/dt = 1.2 \times 10^{-4}$ 、 $dn_02/dt = -3.85 \times 10^{-4}$ である。

【0052】ここで温度変化による屈折率変化率の波長依存は説明を簡単にするため無視できるものとする。g線、e線については(4), (5)式が成立するように各格子厚を設定したので $\phi_0 = 0$ である。

【0053】一方 ϕt は
 $\phi t = (1.2 \times 10^{-4} * 35.4 - (-3.85 \times 10^{-4}) * 35.4) = 0.0179$

となる。従ってg線、e線における回折効率 ηt は
 $\eta t = \text{sinc}^2 (0.0179 * 5 / 1 * 0.435835) = 0.869$
 $\eta t = \text{sinc}^2 (0.0179 * 5 / 1 * 0.54607) = 0.915$
 と初期状態では全波長域でほぼ97%以上の高い回折効率を得られていたのに、g線では約13%程度も低下している。

【0054】図14, 図15の曲線②に温度変化後の回折効率を示す。図中曲線①で示した初期状態の回折効率に対し、曲線②の点線で示された温度変化後の回折効率は、多層回折格子により高い回折効率を得るという主目的が満足されていない。逆に回折効率の変動を2%以下に抑えようとする、許容される温度変動は1.7degとなり、温度制御など特殊な装置が必須となる。従って一般向けのカメラ、ビデオ、事務機等のレンズへの使用はかなり困難である。

【0055】次に本実施形態の温度変化による屈折率変化で回折効率が低下するのを抑制するようにした各層の材料について説明する。初期性能についての材料の選択は(2)式の等号関係を出来るだけ満足するように決定する。

【0056】以下説明を簡単にするために図2に示す2層より成るの回折光学素子で説明する。温度変化により材質の屈折率変化が生じたときの回折効率は上述の

(7)式で表される。初期性能が良好な場合は、 $\phi_0 \approx 0$ と見做してよく、回折効率の変動を減少させるには(7)式中 $\phi t \Delta t$ が十分小さな値をとることが必要である。そのためには ϕt が小さな値をとることが必要となってくる。

【0057】本発明は、 ϕt が小さな値をとる材質の組み合わせで2層より成る回折光学素子を構成することを特徴としている。

【0058】まず許容できる ϕt の値について説明する。1例として回折効率の変動が使用全波長域で2%以下としたときの許容値を求める。温度変化量を $\Delta t = 30 \text{ deg}$ とすると、 $\phi t / m \lambda_0$ は 2.6×10^{-3} 以下とす

る必要がある。このとき回折格子の設計次数を1次($m = 1$)とし、使用波長域を可視光域 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ とすると、 ϕt の値としては短波長の $0.4 \mu\text{m}$ で 1.04×10^{-3} 、長波長の $0.7 \mu\text{m}$ で 1.82×10^{-3} 以下となる材質と格子厚の組み合わせが必要となる。

【0059】次に具体的な材質の組み合わせについて述べる。可視光域で使用する光学材料の多くは、いわゆる光学ガラスであるが、2種類の材質としてそれぞれ光学ガラスを選んだ場合には、 dn_01/dt 、 dn_02/dt 自体が 10^{-6} のオーダーの小さな変化量であるので、前述した $35 \mu\text{m}$ 程度の格子深さを有しても、 ϕt は充分小さな値となる。

【0060】しかし、2種類の材質ともに光学ガラスとするには加工上容易なことではない。従って製造の容易さから2層の内少なくとも一方をプラスチック光学材料や、紫外線硬化樹脂材料などを選択することが望ましい。まずどちらか一方が光学ガラスで他方がプラスチック光学材料や、紫外線硬化樹脂材料を用いた場合について説明する。

【0061】プラスチック光学材料等の dn/dt は一般的に 1.2×10^{-4} 程度の値をもつ。これに比べて光学ガラスの dn/dt は十分小さいので、ガラスの材質の屈折率変化の影響はこの組み合わせでは無視できる。1層めが光学ガラス、2層めがプラスチック光学材料の組み合わせを例にとる。この場合には $\phi t \approx (-dn_02/dt) * d_2$ が前述の所望の値以下になればよく、プラスチック光学材料等で構成される回折格子側の格子厚 d を $8.5 \mu\text{m}$ 以下とすれば、回折効率の温度変化による低下は2%以下に抑制できる。

【0062】つぎに2層ともにプラスチック光学材料や、紫外線硬化樹脂材料を用いる組み合わせの場合、2種類の層の屈折率差を充分大きくとれないので、各格子厚を薄くにするのは容易ではない。そこで各々の層で発生する屈折率変化量をうまく相殺できるように、 ϕt の合成で所望の値以下になるような組み合わせを見つけるのが好ましい。

【0063】例えば2種類の材質の dn/dt が同符号で同量の場合で且つ格子厚 d_1 と d_2 の深さが等しい場合は、温度による回折効率の低下は完全に0にすることができる。また、格子厚 d_1 と d_2 の深さの差が $8.5 \mu\text{m}$ 以下であれば、1種類だけをプラスチック光学材料や、紫外線硬化樹脂材料を用いた場合と同様に回折効率の温度変化による低下は2%以下にすることができる。

【0064】図3、図4は本発明に係る回折光学素子を用いた場合の回折効率の説明図である。図3は設計次数である+1次回折光の回折効率を、図4は設計次数近傍の次数である0次と2次の回折効率を示すグラフである。

【0065】本実施形態の回折光学素子には、第1層としてプラスチック光学材料PMMA ($nd = 1.4917$ 、 $v_d =$

57. 4) を、第2層にはプラスチック光学材料PS (nd=1.5918、 $\nu d=31.1$) をそれぞれ用い、図2に示すように積層して構成している。

【0066】このとき各層の格子厚は第1層が18.9 μ m、第2層が14.7 μ mの厚みである。この構成では第1層と第2層の材料がともにプラスチック材料であり、温度変化による屈折率変化率はほぼ等しく、 $dn/dt=1.2 \times 10^{-4}$ 程度の値となる。

【0067】図3、図4の曲線①、②は前述の図14、図15と同様に曲線①が初期状態の回折効率、曲線②が温度変化後の回折効率を示している。ただし、本実施形態における曲線②の温度変化量 Δt は $\Delta t=30$ degである。従来の材質の温度変化の影響を考慮しない組み合わせの場合、図14での温度変化量はわずか5degの温度変化で回折効率はかなり悪化していたのに比べ、本実施形態の組み合わせでは、温度変化量が大幅に増大したにもかかわらず、回折効率の変化量は僅か2%未満と良好に抑制されている。

【0068】上記実施形態はいずれも回折効率の変化量を2%以下に抑制する場合の組み合わせについて説明をした。ここで回折効率の温度変化による変動の要因である $\phi t \Delta t$ の値が取りうる範囲について述べる。

【0069】本実施形態では、初期性能としての $\phi 0$ の値が十分小さな値となることが前提となっている。比較として初期の $\phi 0$ の値が小さくならない図12に示した1層の回折光学素子の $\phi 0$ の値を調べてみる。この場合、波長400nmと700nmの時の材質であるPMMAの屈折率はそれぞれ1.50798と1.48787になる。従って $\phi 0$ の値は

$$\phi \lambda = 0.4 = (1.50798 - 1) \cdot 1.07 - 1 \cdot 0.4 = 0.359 \text{ m} \lambda \quad 30$$

$$\phi \lambda = 0.7 = (1.48787 - 1) \cdot 1.07 - 1 \cdot 0.7 = -0.254 \text{ m} \lambda$$

0
となる。

【0070】上記1層の回折光学素子の $\phi 0$ の値を参考

$$(n_{01} - 1) d_1 \pm (n_{02} - 1) d_2 \pm \dots \pm (n_{0L} - 1) d_L = m \lambda \quad 0 \dots (8)$$

で表現される。ここで $\phi 0 = (n_{01} - 1) d_1 \pm (n_{02} - 1) d_2 \pm \dots \pm (n_{0L} - 1) d_L - m \lambda$ とすると、同様に全体の回折効率 η も
 $\eta = \text{sinc}^2 (\phi 0 / m \lambda) \dots (9)$
 となる。

【0077】ここで回折方向を図中0次回折光から左寄りに回折するのを正の回折次数とすると、(8)式の \pm の符号は図中左から右に格子厚が減少する格子形状(第

$$\begin{aligned} \eta t &= \text{sinc}^2 \left[\left\{ (n_{01t} - 1) d_1 \pm (n_{02t} - 1) d_2 \pm \dots \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \pm (n_{0Lt} - 1) d_L - m \lambda \right\} / m \lambda \right] \\ &= \text{sinc}^2 \left[\left\{ (n_{01} - 1) d_1 \pm (n_{02} - 1) d_2 \pm \dots \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \pm (n_{0L} - 1) d_L - m \lambda \right\} / m \lambda + \left\{ (dn_{01}/dt) * d_1 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \pm (dn_{02}/dt) * d_2 \pm \dots \right\} \right] \end{aligned}$$

にすれば、本発明の回折光学素子の $\phi t \Delta t$ の絶対値を $m \lambda / 4$ 以下にできれば、温度変化が生じた場合でも、1層のみで構成された回折光学素子の初期状態より回折効率が悪化することはなく、本発明の効果を奏することができる。

【0071】さらに、 $\phi t \Delta t$ の絶対値を $1/8 m \lambda$ 以下にできれば、温度変化が生じた場合の回折効率の変動量を5%以下にすることが可能となり好ましい。

【0072】以上説明したように本発明では温度変化による材質の屈折率変化率 dn/dt と格子厚 d の積からなる $(dn/dt) * d$ の和の値を小さくなるような組み合わせの材料を用いることを特徴としている。

【0073】このような構成を用いれば、温度変化が30degくらいある場合でも、回折効率の変動を良好に抑制でき、一般向けのカメラ、ビデオ、事務機等のレンズへ特殊な温度制御機構を設けることなく使用することができる。

【0074】次に本発明の回折光学素子の実施形態2について説明する。前記実施形態1では2層より成るものの材質の組み合わせについて述べたが、2層に限定するものではなく、格子形状としては図5のような複数の層3-1、3-2、3-3からなる回折光学素子でもよい。そこで2層以上の多層を用いた回折光学素子の場合について説明する。

【0075】説明を簡単にするため図6に示すように各層が空气中に分離されてL層より成る回折格子が配置されている構成とする。各回折格子面3a、3b、3cが密接に配され、全体で1つの回折格子として作用する場合で、且つ格子境界面の反射を考慮しない場合は、図5と図6の回折光学素子はその光学作用が同じとなる。ここで格子厚は、1周期内の各回折格子の最大厚と最小厚の差とする。

【0076】第L層目の材質の波長 λ での屈折率を n_{0L} とする。このように定義すると(2)式に対応する式は

1、第3層)が正となり、逆に左から右に格子厚が増加する格子形状(第2層)が負となる。

40 【0078】次に温度変化でのL層めの材質の屈折率変動率を dn_{0L}/dt とし、温度変化量を Δt とすると各層の温度変化による屈折率変化は、 $n_{0Lt} = n_{0L} + (dn_{0L}/dt) * \Delta t$ に変化する。従って温度変化により回折効率 ηt は

$$\pm (dn_0L/dt) * \Delta t / m\lambda_0 \} \\ = \text{sinc}^2 \{ (\phi_0 / m\lambda_0) + \phi_t \Delta t / (m\lambda_0) \} \dots\dots (10)$$

となる。ここで $\phi_t = \{ (dn_{01}/dt) * d_1 \pm (dn_{02}/dt) * d_2 \pm \dots \pm (dn_{0L}/dt) * d_L \}$ である。

【0079】上式で±の符号の選択は、前述の格子厚の増域に対応している。従って2層以上の多層回折格子においても前述の2層の場合と同様に ϕ_t の値を所望の値以下にするように材質の dn/dt と格子厚の組み合わせを決定する。

【0080】以上述べた説明は、1周期の回折格子の形状に限定して説明を行った。しかし、回折格子の回折効率については、回折格子のピッチは基本的には影響しないことが、公知である。つまり本実施形態は図1に示した1次元の回折格子の他に、例えば図7に示すような回折光学レンズなどあらゆる格子ピッチ形状を有する回折光学素子に应用することができる。

【0081】また格子断面の形状としては例えば図8に示すような階段形状のもの等も適用可能であり、特に限定したものではなく、公知の格子形状を利用することができる。但し、図8に示す階段形状の場合は、実際の格子の厚み d_1' 、 d_2' は前述のキノフォーム時の格子厚 d_1 、 d_2 に対して、

$$d_1' = d_1 * (N-1) / N$$

$$d_2' = d_2 * (N-1) / N$$

なる関係を有している。ここで N は階段格子の格子段数である。階段形状の回折格子の場合は、光学光路長差を決定する場合の格子厚 d と実際の格子厚 d' が異なる。

【0082】また、実施形態の説明では平板上に回折格子を設けた回折光学素子であるが、回折格子をレンズ曲面表面に設けても同様の効果が得られる。

【0083】また、本実施形態では第1の回折格子を基盤上に製作しているが、モールド成形などで、基盤と第1の回折格子を同じ材質の一体成形で製作しても良い。

【0084】また本実施形態では、回折次数が1次光の場合を示したが、1次光に限定するものではなく、2次光などの異なった回折次数光であっても、合成光学光路長差を所望の回折次数で所望の設計波長となるように設定すれば同様の効果が得られる。

【0085】次に本発明の回折光学素子の実施形態3について説明する。前述の実施形態1、2において、第2の回折格子を形成する層の格子厚の一番薄い部分が厚みが0となっていた。この構成だと第2の回折格子は格子ピッチごとに分離された構成となっており、型による製造では、型からうまく剥離し転写しにくい。

【0086】そこで、図9に示すように回折光学素子全域に第2の回折格子3-2を形成する層と同じ材質より成る平坦部4を一定の厚み(図中 d_{off})で付加した構造にしている。これによって第2の回折格子3-2は結合され、型による成形では型から剥離しやすくなるよう

にしている。

【0087】次に本発明の回折光学素子を用いた光学系の実施形態4を図10に示す。図10はカメラ等の撮影光学系の断面を示したものであり、同図中、5は撮影レンズで、内部に絞り6と本発明に係る平板状の回折光学素子1を設けている。7は結像面であるフィルムである。

10 【0088】本実施形態の回折光学素子として、カラー画像の撮影に適した回折光学素子の構成について説明する。本実施形態の場合は、カラーフィルムの各感光層のピーク波長について、前述の(4)、(5)、(6)式に対応する関係を求め、同様に求めている。

【0089】図10では絞り6近傍の平板ガラス面に回折光学素子1を設けたが、これに限定するものではなく、レンズ曲面表面に回折格子を設けても良いし、撮影レンズ内に複数、回折光学素子を使用しても良い。

【0090】また、本実施形態では、カメラの撮影レンズの場合を示したが、これに限定するものではなく、ビデオカメラの撮影レンズ、事務機のイメージスキャナーや、デジタル複写機のリーダーレンズなどに使用しても同様の効果が得られる。

【0091】図11は本発明の回折光学素子を用いた光学系の実施形態5の要部概略図である。図11は、双眼鏡等観察光学系の断面を示したものであり、同図中、8は対物レンズ、9は像を成立させるための像反転プリズム、10は接眼レンズ、11は評価面(瞳面)である。図中1は回折光学素子である。回折光学素子1は対物レンズ8の結像面7での色収差等を補正する目的で形成されている。

【0092】本実施形態では、対物レンズ8側に回折光学素子1を形成した場合を示したが、これに限定するものではなく、プリズム表面や接眼レンズ10内の位置であっても同様の効果が得られる。結像面7より物体側に設けると対物レンズ8のみでの色収差低減効果があるため、肉眼の観察系の場合、少なくとも対物レンズ8側に設けることが望ましい。

【0093】また本実施形態では、双眼鏡の場合を示したが、これに限定するものではなく地上望遠鏡や天体観測用望遠鏡などであってもよく、またレンズシャッターカメラやビデオカメラなどの光学式のファインダーであっても同様の効果が得られる。

【0094】

【発明の効果】本発明によれば以上のように、基盤上に2層又はそれ以上の多層を積層して回折光学素子を形成するとき、各層の材質と格子厚を適切に構成することにより、高い回折効率を有するとともに、温度変化による屈折率変動で回折効率が劣化することがなく、常に使用波長域全域で高い回折効率が維持できるような回折光学

素子及びそれを用いた光学系を達成することができる。

【0095】また本発明の回折光学素子を撮影レンズに使用すれば、特殊な温度制御機構をレンズ内に使用する必要はなく、通常の屈折レンズと同等の使用条件下で所望の特性が得られ、安価で高精度な撮影レンズを提供できる。

【0096】また本発明の回折光学素子を観察光学系に使用すれば、特殊な温度制御機構を光学系内に使用する必要はなく、通常の屈折光学系と同等の使用条件下で所望の特性が得られ、安価で高精度な観察光学系を提供できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の回折光学素子の実施形態1の要部正面図

【図2】本発明の回折光学素子の実施形態1の要部断面図

【図3】本発明の回折光学素子の実施形態1の設計次数の回折効率の説明図

【図4】本発明の回折光学素子の実施形態1の設計次数の近傍の回折効率の説明図

【図5】本発明の回折光学素子の実施形態2の要部断面図

【図6】本発明の回折光学素子の実施形態2の概念図

【図7】本発明の回折光学素子の他の形態の説明図

【図8】本発明の回折光学素子の他の形態の要部断面図

【図9】本発明の回折光学素子の実施形態3の要部断面図

【図10】本発明の回折光学素子のを用いた実施形態4の概略図

【図11】本発明の回折光学素子のを用いた実施形態5の概略図

【図12】従来の回折光学素子の要部断面図

【図13】従来の回折光学素子の回折効率の説明図

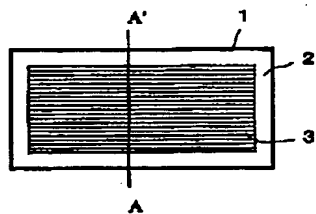
【図14】従来の回折光学素子の設計次数の回折効率の説明図

【図15】従来の回折光学素子の設計次数近傍の回折効率の説明図

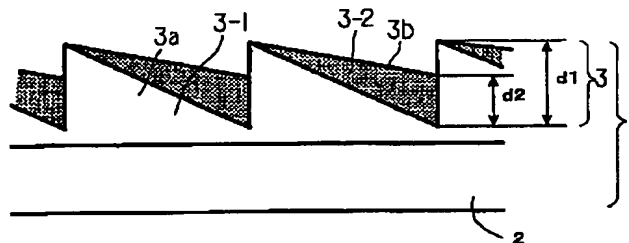
【符号の説明】

- 1 回折光学素子
- 2 基盤
- 3 多層部
- 3a, 3b 回折格子面
- 3-1, 3-2, 3-3 層(回折格子)
- 5 撮影レンズ
- 6 絞り
- 7 結像面
- 8 対物レンズ
- 9 像反転プリズム
- 10 接眼レンズ
- 11 瞳位置

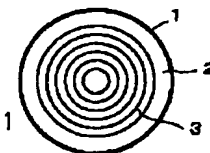
【図1】



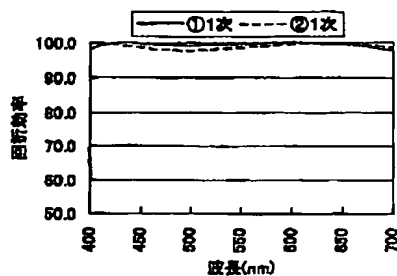
【図2】



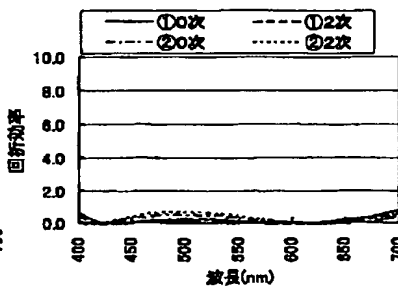
【図7】



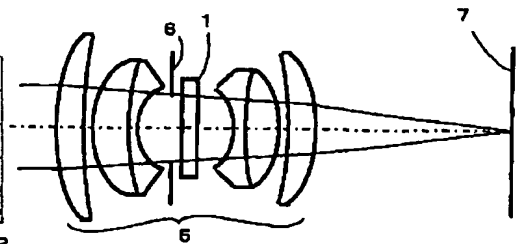
【図3】



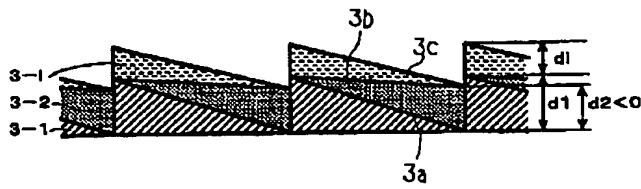
【図4】



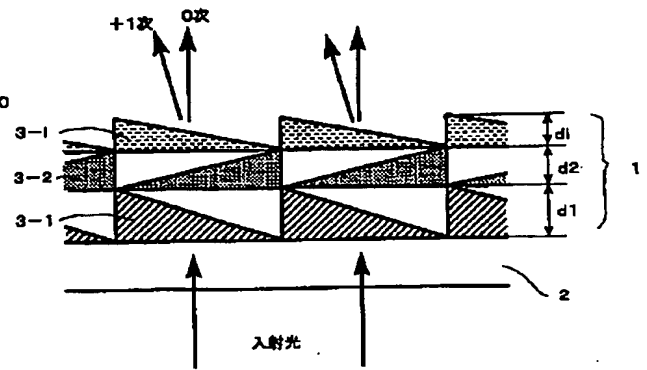
【図10】



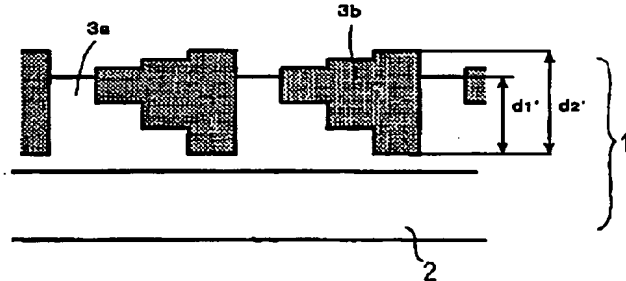
【図5】



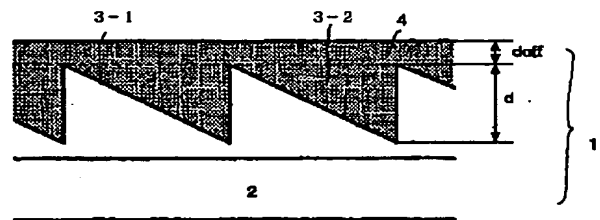
【図6】



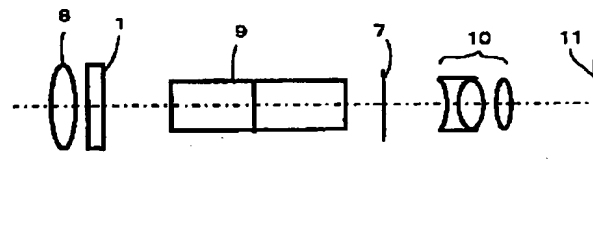
【図8】



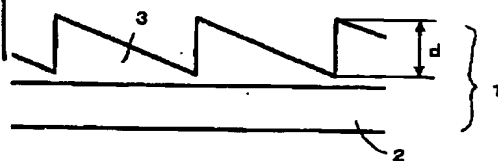
【図9】



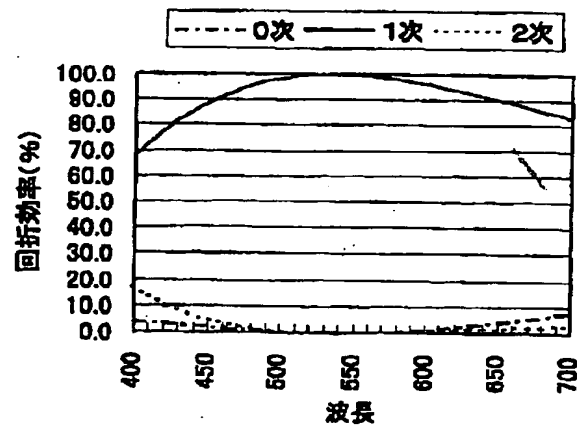
【図11】



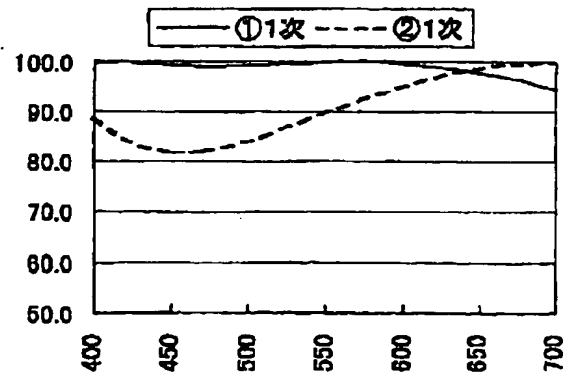
【図12】



【図13】



【図14】



【図15】

